

3. Непрерывная опережающая профессиональная подготовка кадров для горно-металлургической отрасли: проблемы и теоретические основы: монография / Е.М. Разинкина, Е.А. Ильина [и др.]: под ред. Е.М. Разинкиной, Е.А. Ильиной. Магнитогорск: МГТУ, 2010. 110 с.

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕРТЕРЕ

Советкин В.Л., Соловьев В.В.

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
г. Екатеринбург, Россия*

Анализ процесса продувки штейна в конвертерах выявил ряд проблем, в частности, недостаточную стойкость футеровки ванны конвертера в районе ввода струй воздуха, интенсивное образование «бороды» в горловине (место выхода газов из конвертера) завышенный удельный расход воздуха (и связанные с этим высокие энергозатраты, а также трудности выделения сернистых газов из «разбуженных» продуктов процесса).

Однако наиболее существенным недостатком представляется «статичность» конструкции сочленения средств ввода окислителя и конвертера, не позволяющая варьировать параметры процесса продувки в более широком диапазоне, а именно изменение угла наклона, глубины и места ввода струй окислителя (а также возможность их дробления) в ванну в зависимости от параметров штейна. Тем самым сужается диапазон технологических решений процесса продувки.

В большинстве существующих конвертеров воздух вводится в ванну струями, вытекающими из большого количества сопел, представляющих собой наклонно установленные патрубки с внутренним диаметром 50 мм и длиной 460 мм. При этом сопла расположены в один ряд с шагом 150–200 мм. Общий расход воздуха составляет в среднем 35000 м<sup>3</sup>/ч при давлении перед соплами ~1,0 кг/см<sup>2</sup> (диапазон изменения расхода от 20000 до 50000 м<sup>3</sup>/ч при давлении от 0,7 до 1,5 кг/см<sup>2</sup>).

В качестве образца нами выбран горизонтальный конвертер с внутренними размерами (по футеровке): L = 86120 мм Ø = 2870 мм. На рис. 1 представлен эскиз модели, выполненной в масштабе 1:10.

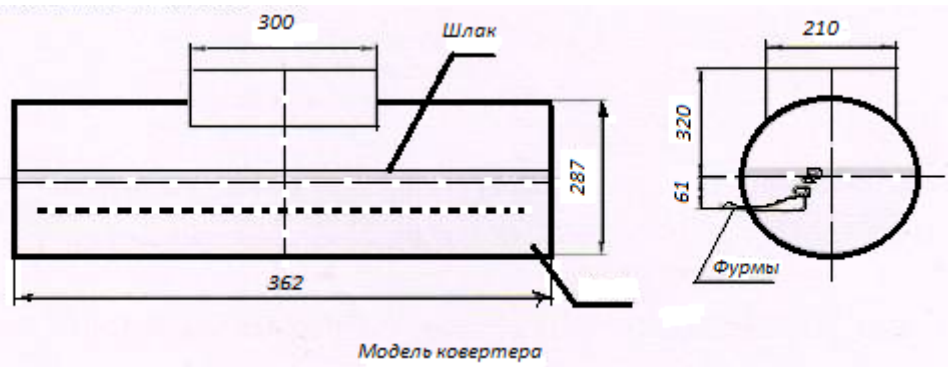


Рис. 1. Эскиз модели

Модель позволит использовать различные жидкости и газы, сопоставимые по плотности и вязкости, в том числе по величине поверхностного натяжения; дополнительно к измерениям скоростей газов и жидкости нами предусмотрено также использование скоростной киносъемки.

Исследование особенностей взаимодействия барботирующих струй газа с жидкой ванной. Для этого на модели производится продувка ванн жидкостью газовой средой с различными параметрами. При этом предполагается исследование следующих параметров:

- скорости выхода газовой струи в жидкость, ее энергетических параметров (расход газа, глубина точки ввода, размер сопла и др.);
- эффективности взаимодействия жидкости и газа в ванне (изменение угла встречи, распределение газов в ванне, использование нестационарностей движения);
- выбор и экспериментальное исследование условий эффективного гидродинамического режима работы ванны с изменением условий барботажа газами путем формирования их за счет конструктивных и технологических параметров;
- разработка и оценка эффективных способов интенсификации работы продуваемой, газами жидкой ванны. При выполнении этого этапа работы следует обосновать ряд эффективных способов интенсификации гидродинамической работы ванны с целью обеспечения наиболее полного использования энергетических свойств газовых струй на основе использования нестационарностей движения как газов, так и жидкой ванны (пульсирующее дутье, энергия акустического поля, движения ванны и т.д.).

Для оценки эффекта взаимодействия газовой среды и жидкой ванны следует использовать локальные приборы контроля давления, скорости, степени внедрения изучаемых сред на основе оптических измерений.

Итогом работы являются установленные закономерности взаимодействия двух сред в условиях ограниченного движения рабочего пространства под действием газовых струй.

Предварительные исследования гидродинамики металлургических плавильных агрегатов позволили установить в качестве основных параметров, определяющих условия развития струйных процессов в жидкой ванне:

- высоту ванны выше места ввода в нее струйного процесса ( $x_1$ ), который предлагается оценивать относительной высотой максимальной глубины ввода струи в жидкость, %. Интервал изменения этого параметра, исходя из практических данных, принимаем от 0 до 30 %.
- угол наклона струи к горизонту ( $x_2$ ), град. Принимаем интервал изменения этого параметра от 0 (горизонтальное расположение) до 60°.
- интенсивность продувки ванны, которая определяется как расход дутья, приходящего на 1 см<sup>2</sup> площади фурм в минуту ( $x_3$ ). Принимаем интервал его изменения от 0,1 до 1,5 м<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>мин.

Для изучения гидродинамики конвертера использовалась холодная прозрачная модель (рис. 1). В качестве продуваемой среды использовался холодный воздух. Основная масса исследований проводилась на воде. Для изучения влияния плотности продуваемой среды применялся раствор цинкового купороса различной плотности. При проведении экспериментов определялись как мгновенные значения давления в предсопловом пространстве, так и осредненные во времени параметры газовой среды: давление воздуха, его расход, визуализация течения струй и вторичных газовых образований на модели с регистрацией гидродинамических процессов методами кино – и фотосъемки.

Для измерения нестационарной составляющей давления подачи использовались индукционные датчики с рабочей частотой 2–10 кГц. Среднее давление и расход газа определялись с помощью демпфированных датчиков, манометров и ротаметров. Проведенные оценки погрешности измерений дали следующие результаты: для давления – не более 5 %, для расхода газа – не более 10 %. Характер движения жидкости в ванне исследовался с помощью гидрокинетических индикаторов – частиц с удельным весом, близким к удельному весу жидкости. Траектории частиц фиксировались с помощью кино- и фотоаппаратуры.

В процессе исследований значения числа Маха не превышала 1,0.

Модель имеет длину 862 мм, диаметр 287 мм. Угол наклона сопел к горизонту устанавливался путем пространственного изменения их расположения при перекачивании корпуса модели по твердой поверхности. Диаметр сопел составил 2 мм. Количество сопел равно 52 шт.

Статистические данные позволили выделить три газодинамических режима истечения струй. При небольших давлениях подачи газа близких к гидродинамическому давлению

жидкости на срезе сопла в интервале  $(0,05-0,08) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  и скоростях истечения воздушной струи 20–30 м/с наблюдается пузырьковый режим движения газов. На срезе сопла образуются отдельные газовые пузыри, размер, форма и частота отрыва которых определяются расходом и свойствами жидкости и газа. Было отмечено, что частота отрыва пузырей изменяется с увеличением давления газовой подачи от 5 до 10 Гц и слабо зависит от свойств газов. При использовании вязких жидкостей размер пузырей увеличивается, а характерная для воды сферическая их форма искажается ближе к эллипсоидной. При больших углах наклона фурм отдельные пузыри вытягиваются в вертикальном направлении. При этом частота отрыва их снижается вплоть до 1–3 Гц.

По мере повышения уровня избыточного давления подаваемого воздушного дутья до  $(0,08-0,1) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  при скоростях выхода газовых струй 20–200 м/с режим движения газовых струй переходит в пульсационный. При этом размеры пузырей увеличиваются, их форма вытягивается в сторону перемещения, а частота образования возрастает до 10–15 Гц (рис. 2).

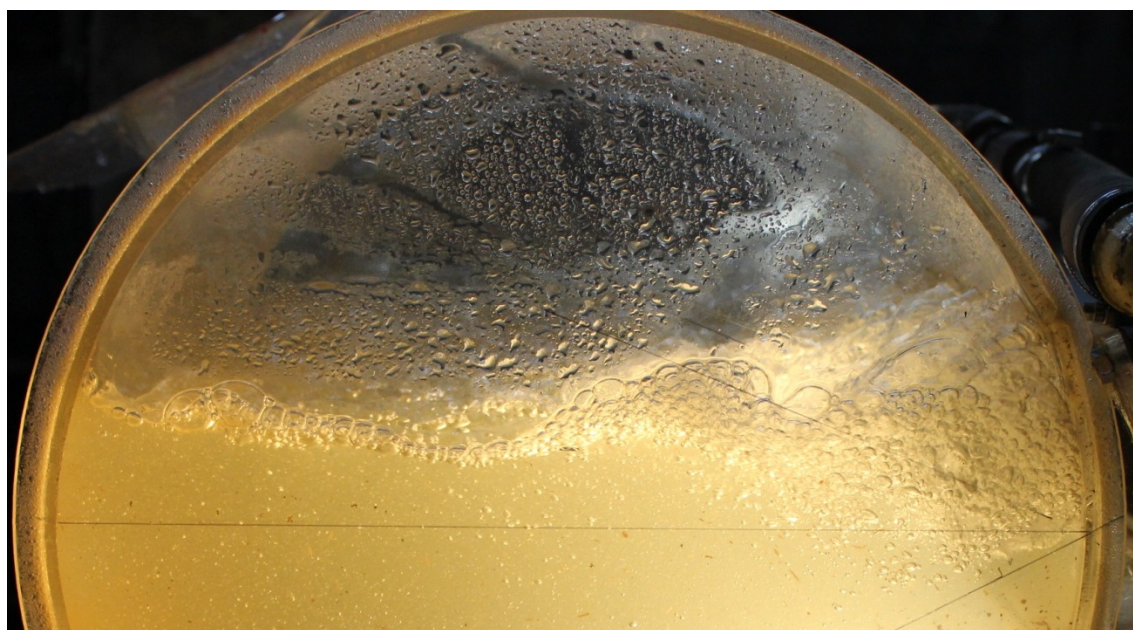


Рис. 2. Развитый струйный процесс в жидкой ванне конвертера

При более высоком избыточном давлении подаваемой газовой среды ( $P_0 \geq (1,2-1,5) \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ ) и скоростях газов близких к скорости звука в ванне образуется ярко выраженный двухфазный движущийся струйный поток с пульсирующим в широком высокочастотном спектре турбулентным пограничным слоем. Формирующиеся продольные неустойчивости сопровождаются отрывом массивов пузырей с частотой 10–20 Гц. При повышенных скоростях выхода газов из сопла происходит развитие струи по всей ее длине с барботажом мелких пузырей на поверхности ванны. Исключение составляет начальный осесимметричный участок. Наличие Архимедовой силы приводит к последовательному искривлению траектории струи. В конце струи происходит сброс газов в виде мелких баработирующих пузырей.

При развитии струйного процесса в жидкости при этом режиме можно выделить три области (рис. 3).

1 – зона развития струи в жидкости. На протяжении этого участка струя развивается по законам развития струйного процесса при обмене энергией с окружающей ее жидкостью и вовлечением в режим движения периферийных областей. По периферии струи образуется газожидкостная смесь. В целом струя представляет собой газовую среду с вовлеченными частицами жидкости. Протяженность этой зоны в направлении развития струи с увеличением давления газов возрастает.



Ниже струйного процесса в ванне в результате развития эжекционных явлений образуется нижняя зона циркуляции жидкости (III) с движением ее в направлении против часовой стрелки. Она практически не содержит газовых пузырей.

Всплывающие газовые пузыри и двухфазные массивы при любом режиме продувки образуют барботажную зону (IV), которая локализуется вблизи сопловой поверхности. Наличие в ванне верхней (I) и нижней (II) зон циркуляции в жидкой ванне способствует сносу пузырей к внутренней поверхности рабочего пространства конвертера, что при значительных скоростях движения массы жидкости и наличии пульсаций струи является одной из существенных причин для разрушения стенок металлургических агрегатов на границе раздела ванны и газовой среды.

Увеличение давления продувки, скорости выхода струи из сопла, снижение уровня жидкости над местом ввода дутья, смещение точки подачи газов в ванну будут способствовать смещению максимума высоты выбросов над уровнем ванны ближе к ее центру.

Наличие циркуляционных зон как в верхней, так и нижней области ванны относительно струйного процесса будет способствовать распространению газов по массе жидкости. Форма и размеры устойчивых газовых образований определяются условиями равновесия и зависят от гидростатического давления в слое жидкости, а также природы газа и жидкости.

Так, при хорошо развитом струйном процессе, может возникнуть ситуация когда область верхней циркуляционной зоны насыщенной газами уменьшается до минимального объема, а нижняя зона распространяется на всю ванну с ограниченной интенсивностью развития окислительных процессов. Однако в ней наиболее интенсивно происходит развитие движения газов в зоне барботажа, где скорость перемещения газовых пузырей на порядок превышает скорость циркуляции жидкой массы по объему ванны (0,2–0,5 м/с). Все это приводит к значительному выбросу газов из ванны, а ограниченное время контакта их с межфазной поверхностью снижает эффективность использования дутья и замедляет развитие тепломассообменных процессов.

Для оценки степени развития струйных процессов в продуваемой ванне были выбраны следующие параметры:

1. Длина струи от точки ввода дутья до максимального развития струйного процесса по оси струи  $L_{стр.}$ .
2. Диаметр струи определяемая по ширине струи в конце второго расширенного участка  $D_{стр.}$ .
3. Угол наклона траектории движения газовых пузырей относительно вертикали  $\alpha$  по часовой стрелке.
4. Величина первой амплитуды выбросов жидкости в зоне барботажа относительно линии покоя ванны  $A_1$ .
5. Место расположения первой амплитуды выбросов жидкости в зоне барботажа относительно края ванны сопловой стенки  $L_1$ .
6. Величина второй амплитуды выбросов жидкости в зоне барботажа относительно линии покоя ванны  $A_2$ .
7. Место расположения первой амплитуды выбросов жидкости в зоне барботажа относительно края ванны сопловой стенки  $L_2$ .
8. Длина полного затухания поверхностных колебаний ванны  $L_{зат.}$ .
9. Частота поверхностных колебаний в ванне  $\nu$ , Гц.
10. Протяженность первой зоны циркуляции от края ванны в направлении развития,  $L_{13Ц.}$ .
11. Протяженность второй зоны циркуляции от начала струйного процесса в направлении развития,  $L_{23Ц.}$ .

Полученные данные позволяют исследовать закономерности развития гидродинамических эффектов взаимодействия комплекса газовых струй с жидкой ванной с целью установления оптимальных технологических параметров образования барботажной зоны в рабочем пространстве горизонтального конвертера.